LA FORCE D'INERTIE

La force d'inertie est, avec la force centrifuge et la force de Coriolis, l'une des trois forces fictives utilisées par les physiciens dans le cadre de descriptions imaginaires.

Qu'est-ce qu'une force fictive ? Qu'est-ce qu'une description imaginaire ? Qu'appelle-t-on force d'inertie ? D'où provient-elle et comment agit-elle ? Pourquoi cette force n'existe-t-elle pas vraiment ? Voici quelques éléments de réponse…

Petit rappel…

Une force désigne toute cause capable de modifier la vitesse ou la trajectoire d'une masse. On distingue deux types de forces : les forces réelles, qui sont les véritables causes du mouvement, et les forces fictives (également appelées forces apparentes, forces imaginaires, ou pseudo-forces), qui interviennent uniquement dans le cadre de descriptions imaginaires.

Définition

Inertie vient de ''*inerte*''. La force d'inertie se définit comme la force délivrée par un objet inerte. Comment un objet inerte pourrait-il délivrer la moindre force ? Cette définition semble paradoxale… En réalité, tout s'explique quand on sait que la force d'inertie appartient à la catégorie des forces fictives, ainsi que nous allons le voir…

Une description réelle…

Imaginons un camion immobile, stationné sur un terrain plat, avec un ballon posé au milieu de la benne. Mettons le camion en mouvement et observons la scène du haut d'une fenêtre ou d'un balcon par exemple : dès que le camion démarre, le ballon donne l'impression de rouler vers l'arrière de la benne, comme s'il était soumis à une force apparente.

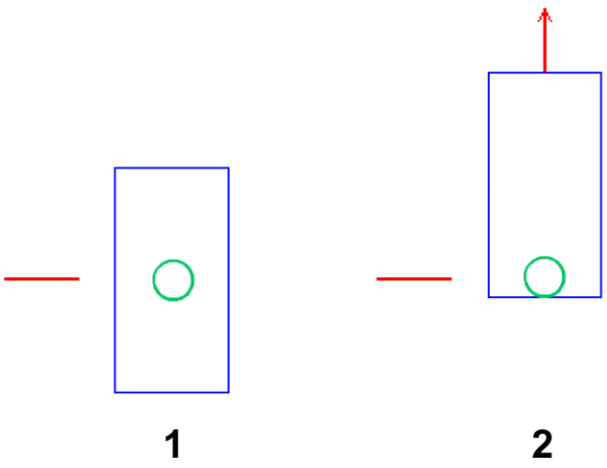
Cette force apparente, c'est la force d'inertie. Mais attention ! Le mouvement du ballon relève d'une illusion d'optique. En effet, un repère au sol permet de vérifier qu'en réalité le ballon ne s'est pas déplacé, il a seulement été rattrapé puis heurté par la ridelle arrière du camion.

Explication : la seule force sollicitée dans cette expérience est la force de traction créée par le moteur du camion. Cette force s'exerce sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol. Elle se transmet ensuite aux roues, au châssis, à la carrosserie et à la benne ainsi qu'à tout ce qu'elle contient, ballon compris.

Le point de contact entre la benne et le ballon étant une surface trop faible pour communiquer la force nécessaire à l'accélération du ballon, celui-ci reste donc immobile par rapport à la Terre tandis que le camion démarre [(1)].

Et c'est justement parce que le ballon reste immobile, totalement insensible au mouvement du camion, donc complètement inerte, qu'il donne l'illusion de bouger, d'où le nom donné à cette force.

En réalité, dans cette expérience, la seule et unique force sollicitée, la seule et unique force qui existe vraiment est la force de traction qui s'est exercée sur les roues motrices du camion au contact du sol. Il n'y a pas eu d'autre force mise en jeu dans cette description. La force d'inertie est bien une force imaginaire.



Expérience vue de dessus :
1. Un ballon est posé au milieu de la benne d'un camion immobile.
2. Quand le camion démarre, on a l'impression que le ballon se déplace vers l'arrière de la benne.
Un repère au sol (trait rouge) permet de vérifier qu'en réalité le ballon n'a pas bougé.

Une description imaginaire…

Imaginons maintenant que le ballon bouge tout seul, sans que personne ne le touche, et sans pour autant que le camion démarre. C'est impossible, n'est-ce pas ?

Oui bien sûr : le ballon ne peut pas bouger tout seul, c'est impossible !

Au diable la réalité ! Fermons les yeux un instant et imaginons que l'expérience précédente se déroule sans le moindre repère visuel par rapport au sol…

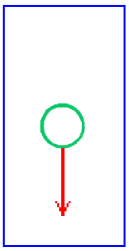
Dans une telle description, purement imaginaire bien sûr, la force de traction délivrée par le camion n'existe plus.

Il faut alors expliquer le mouvement du ballon sans s'occuper du camion, c'est à dire en faisant totalement abstraction de son déplacement propre. Oui ! Il faut faire comme si le camion n'avait pas bougé !

Bel effort d'imagination ! Les physiciens adorent ce genre d'exercice [(2)]…

C'est donc ça la force d'inertie : c'est bien une force apparente, c'est à dire une force fictive servant à expliquer un mouvement qui se manifeste uniquement dans le cadre d'une description purement imaginaire !…

En réalité, la force d'inertie n'existe pas, n'existe nulle part, n'existe jamais !



La force d'inertie est une force purement imaginaire : elle serait théoriquement capable de faire bouger le ballon sans qu'il soit nécessaire de démarrer le camion…

La mascotte suspendue au rétroviseur...

Voici une autre expérience facile à réaliser et très souvent interprétée à tort comme apportant la preuve de l'existence de la force d'inertie.

Il suffit de suspendre une mascotte ou un pendule quelconque au rétroviseur intérieur d'une voiture. En ligne droite et à vitesse constante, la mascotte n'est soumise qu'à la seule force de gravitation, elle reste donc strictement immobile et indique une verticale parfaite.

Mais lors des variations de vitesse ou de trajectoires, la mascotte s'incline. D'où vient ce mouvement ? Voici l'explication correcte…

Détaillons ce qui se passe au démarrage : de l'intérieur de la voiture, on constate que la mascotte s'incline vers l'arrière, on a l'impression qu'elle est animée d'une force apparente, ce terme soulignant bien qu'il s'agit là d'une observation valable uniquement dans le référentiel voiture.

Mais en réalité, dans le référentiel Terre, la mascotte n'a aucune raison de bouger sans qu'une force s'exerce sur elle. Elle reste donc immobile, complètement inerte, tout comme le ballon dans la benne du camion, et ce jusqu'au moment où l'accélération de la voiture lui est transmise. D'où vient cette accélération et comment est-elle transmise ?

L'accélération de la voiture provient de la force de traction qui s'exerce sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol. Cette force est transmise ensuite au reste de la voiture et à tout ce qu'elle contient par l'intermédiaire des roues, du châssis et de la carrosserie. Elle parvient enfin à la mascotte grâce au rétroviseur et à la ficelle au bout de laquelle elle pend. D'où son inclinaison.

Cette force apparente, c'est la force d'inertie ! Elle semble faire bouger la mascotte, mais cette observation ne relève là encore que d'une simple illusion d'optique. En réalité, cette force n'existe pas et un repère au sol permettrait de vérifier que, dans la phase d'inclinaison de la mascotte, il n'y a aucun déplacement par rapport à la Terre. Ce n'est qu'une fois l'inclinaison stabilisée que la mascotte se déplace vraiment et prend de la vitesse, grâce la force de traction que lui transmet la ficelle...

Le même phénomène se reproduit au freinage, et ces explications permettent de mieux comprendre ce que peuvent ressentir les passagers…

L'effet ''ceinture de sécurité''…

Lors d'un freinage puissant ou d'une collision, tout passager de voiture a l'impression d'être plaqué contre la ceinture de sécurité, comme animé d'une force apparente…

Cette force apparente, c'est la force d'inertie, bien sûr, mais il ne s'agit là encore, que d'une impression !

En réalité, cette force n'existe pas plus dans cette expérience-là que dans les autres. Alors d'où vient cette impression ? Voici l'explication correcte…

Lorsque le conducteur appuie sur la pédale de freins, la voiture est soumise à la force de freinage qui s'exerce sur les pneumatiques au contact du sol. Cette force se transmet ensuite aux roues, au châssis, à la carrosserie et à tous ses accessoires.

Les objets solidement fixés à la carrosserie subissent cette force intégralement et sans retard, l'arrimage consistant justement à donner les moyens à la carrosserie de communiquer cette fameuse force.

Or ce n'est pas le cas des passagers qui, bien qu'assis sur leurs sièges, gardent tout de même une certaine liberté de mouvement.

Lorsque la voiture commence à ralentir, les passagers conservent donc leur vitesse initiale, tout comme la mascotte dans l'expérience précédente, et ce jusqu'à ce que les ceintures de sécurité leur communiquent cette fameuse force de freinage…

Dans cet exemple, les ceintures de sécurité jouent pour les passagers le même rôle que la ficelle pour la mascotte.

Les passagers d'une voiture ne sont donc jamais projetés en avant, ils sont simplement freinés par la carrosserie et les ceintures de sécurité… ou par le tableau de bord et le pare-brise, s'ils ont oublié de boucler leurs ceintures de sécurité !…

Les sensations qu'ils éprouvent viennent donc uniquement de la force de freinage que leur communique la voiture… La force d'inertie étant une force imaginaire, il est bien évidemment impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets.

Le mouvement des bagages…

Et les bagages dans le coffre ou les objets posés sur la tablette arrière ?

L'explication est identique à celle qui concerne les passagers : lors d'un freinage ou d'une collision, le mouvement des bagages dans le coffre ou des objets posés sur la tablette arrière n'est qu'apparent.

En réalité, ces objets ne sont jamais projetés en avant, ils conservent simplement leur vitesse initiale s'ils n'ont pas été solidement fixés à la carrosserie, et tant qu'une partie quelconque de la carrosserie ne peut leur communiquer la moindre force de freinage.

Action et réaction : le troisième principe de Newton

Une autre erreur fréquente consiste à présenter la force d'inertie comme étant la réaction (au sens *newtonien* du terme) associée à la force de traction ou de freinage.

Mais que dit ce fameux troisième principe de Newton ? C'est le principe de l'action et de la réaction : ''*Toute force s'exerçant sur un corps entraîne une réaction d'égale intensité mais de sens opposé.*'' (3)

Ce principe est sans doute le plus mal compris de tous ceux jamais énoncés par Newton !

En effet, la réaction associée à une quelconque force ne peut exister et ne peut se manifester que dans le cadre d'une description unique, et à partir d'un référentiel commun. Là encore, tout mélange est rigoureusement prohibé !

Logiquement, la force de traction ou de freinage s'exerçant au contact du sol, les réactions associées à ces deux forces ne peuvent se manifester qu'au niveau du sol, elles aussi, et pas ailleurs.

Isaac Newton avait les pieds sur terre, lui !

De fait, cette fameuse réaction existe bien ! En effet, quand un véhicule terrestre accélère ou freine, les pneumatiques prennent appui sur le sol ; ils exercent alors une poussée horizontale qui serait parfaitement capable de perturber la rotation de la Terre, si ce n'était la masse de la Terre elle-même, bien trop grande par rapport à celle du véhicule pour que son mouvement en soit affecté (4) !

Cette poussée, c'est la réaction associée à la force de traction ou de freinage.

Autrement dit, la notion de réaction n'a absolument rien à voir avec le concept de force imaginaire, et la force d'inertie n'est pas, ne peut pas être, n'est jamais la réaction associée à une quelconque force !

Choisir le bon référentiel !…

Ces diverses réflexions nous ramènent à la théorie des référentiels, et on peut résumer ainsi les expériences précédentes :

- les unes sont observées dans un référentiel général (ici la Terre) et décrivent un mouvement réel ;

- les autres sont observées dans un référentiel restreint (ici le véhicule) et décrivent un mouvement apparent.

Bien évidemment, ces deux référentiels sont parfaitement distincts, il n'est donc pas question de les confondre, encore moins de les mélanger (voir le dossier ADILCA ‘‘*référentiels*’’). Or c'est pourtant une erreur fréquente !

Choisir la bonne description !…

Pour être complet, précisons enfin que, dans un référentiel général (ici, la Terre), la description peut être ‘‘dynamique’’ ou ‘‘statique’’ :

- dans une description ‘‘dynamique’’, la masse de la voiture est accélérée ou décélérée grâce à la force de traction ou de freinage qui s'exercent à la périphérie des pneumatiques ;

- dans une description ‘‘statique’’, la voiture est immobile ; on imagine alors une force fictive capable de comprimer les pneumatiques et les suspensions avec un effet comparable à celui que l'on observe lorsque la voiture est accélérée ou décélérée ; cette pseudo-force est supposée s'exercer sur le centre de gravité de la voiture.

Bien évidemment, ces deux descriptions sont totalement contradictoires, il n'est donc pas question de les superposer (voir le dossier ADILCA ‘‘*statique et dynamique*’’). Or c'est malheureusement une bourde classique !

Force d'inertie : la véritable définition !

Ce qui précède nous amène à ces deux définitions originales et inédites de la force d'inertie :

‘‘Dans le référentiel voiture, on appelle force d'inertie la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité des passagers et des bagages d'une voiture immobile pour les voir s'animer d'un mouvement identique à celui observé dans la réalité lorsque la voiture est soumise à la force de traction ou de freinage.’’

‘‘Dans le référentiel Terre, on appelle force d'inertie la force imaginaire qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité d'une voiture immobile pour créer sur les suspensions et

les pneumatiques un effet identique à celui observé dans la réalité lorsque la voiture est soumise à la force de traction ou de freinage.''

Insistons sur les trois exigences fondamentales de ces définitions :

1. l'immobilité de la voiture ;

2. le caractère hypothétique de cette fameuse force, clairement affirmé par l'emploi du conditionnel : ''*la force qu'il faudrait exercer…*'' ;

3. l'impossibilité technique d'exercer directement la moindre force sur le centre de gravité d'une masse quelconque… (tentez l'expérience et vous conviendrez que cette exigence seule suffirait à prouver le caractère irréel de la force d'inertie !)

Trois bonnes raisons pour affirmer de façon claire, nette et définitive que la force d'inertie n'existe pas !

Calcul de la force d'inertie…

Peut-on calculer l'intensité de la force d'inertie ? Oui, il est tout à fait possible de calculer l'intensité d'une force imaginaire, c'est à dire l'intensité d'une force qui n'existe pas, mais qu'il faudrait solliciter, si… Les physiciens adorent ce genre d'exercice !

Cependant, en ce qui concerne la force d'inertie, la démarche habituelle n'est pas la bonne, voici pourquoi…

Commençons par le commencement : en science, un bon principe consiste à se demander d'où vient la valeur qu'on a sous les yeux, ce qu'elle représente, et comment elle a été obtenue. Un principe de traçabilité, en quelque sorte…

Car, avant tout calcul, un physicien doit réaliser des expériences, définir des repères et effectuer des mesures. C'est le cheminement le plus important. Les calculs ne viennent qu'ensuite, mais ils se basent forcément sur des mesures concrètes, des valeurs numériques dont on peut garantir l'origine et la signification, bref, des grandeurs qui existent vraiment…

Ce n'est qu'ultérieurement, par la grâce d'un raisonnement purement théorique, que le physicien pourra transposer son raisonnement à l'étude d'un phénomène imaginaire.

Car il n'y a pas, il ne peut pas y avoir de force imaginaire sans force réelle. Mais l'inverse n'est pas vrai : la force de traction ou de freinage peuvent parfaitement être considérées seules, dans une série d'expériences et de mesures, par exemple, tandis que la force d'inertie, elle, est toujours obligatoirement tributaire d'une force de traction ou de freinage !

Dès lors, il est strictement interdit d'évoquer la force d'inertie sans expliquer d'où elle vient, ce qu'elle représente et comment elle a été obtenue.

Bref, s'il est tout à fait possible de parler de la force de traction ou de freinage seule, il est interdit de parler de force d'inertie sans parler de force de traction ou de freinage ! En d'autres termes, pour arriver à une force imaginaire, il faut partir d'une force réelle. La traçabilité du raisonnement, c'est ça !

Ce sont les détails de cette démarche, somme toute très logique, qui sont souvent ignorés ou occultés. Pour l'illustrer, voici un exemple concret.

Un exemple concret…

Prenons l'exemple d'une voiture de masse 1 500 kg qui accélère de 0 à 20 $m.s^{-1}$ en 10 secondes. Calculons d'abord l'intensité de l'accélération supposée constante :

$$\gamma = V / T$$

$$\gamma = 20 / 10 = 2\ m.s^{-2}$$

La relation fondamentale de la dynamique permet ensuite de calculer l'intensité de la force de traction **F** qui s'est exercée sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol :

$$F = M \gamma$$

$$F = 1\,500 \times 2 = 3\,000\ N$$

Ce n'est qu'à partir de ce résultat qu'on peut enfin calculer l'intensité de la force d'inertie **F'**, cette fameuse force qu'il faudrait exercer sur le centre de gravité de la voiture, si celle-ci était immobile, pour produire un effet comparable à celui observé dans la réalité quand la voiture est soumise à la force de traction ou de freinage. On utilise alors cette relation, et uniquement celle-ci :

$$F' = - M \gamma = - F$$

Autrement dit, le calcul est très vite fait : à une force réelle de **3 000 N** dans une description dynamique correspond une force imaginaire de **– 3 000 N** dans une description statique ! D'où la confusion !

En effet, les vecteurs ''force réelle'' et ''force imaginaire'' ont le même module ! Mais attention, tout les distingue :

- leur point d'application, (l'un de ces deux vecteurs trouve son origine à la périphérie des pneumatiques, l'autre au centre de gravité) ;

- leur direction (ici, le signe [–] souvent oublié est déterminant, il montre que la force d'inertie, si elle existait, devrait avoir une orientation spatiale rigoureusement opposée à celle de la force de traction ou de freinage) ;

- et le fait que l'un de ces deux vecteurs s'applique sur une voiture en mouvement, l'autre sur une voiture immobile !

Bref ! Ces deux vecteurs n'appartiennent pas du tout à la même description ! Gare aux mélanges !

Ainsi, l'intensité de la force d'inertie se déduit de celle de la force de traction ou de freinage, jamais l'inverse. Et la grandeur censée prouver l'existence de la force d'inertie résulte en réalité d'une confusion avec la force de traction ou de freinage !

Le capteur à inertie…

Un simple capteur à inertie (appareil encore appelé capteur d'accélération) permet-il de mesurer directement l'intensité de la force d'inertie ?

Détaillons le principe de fonctionnement de cet appareil : une masselotte capable de coulisser dans un tube est maintenue au repos par deux ressorts, mais peut néanmoins se déplacer le long d'un curseur en cas d'accélération ou de décélération de la voiture.

Ainsi, ce que mesure le curseur, c'est tout simplement l'intensité de la force de traction ou de freinage communiquée à la masselotte par la voiture ! Le capteur d'inertie fonctionne comme un vulgaire dynamomètre, tout simplement !

Reprenons l'exemple d'une voiture qui accélère de 0 à 20 $m.s^{-1}$ en 10 secondes. Le curseur indique une force de 2×10^{-2} N.

Si la masse de la masselotte est de 10^{-2} kg, la relation fondamentale de la dynamique permet de calculer l'intensité de l'accélération communiquée à la masselotte par la voiture :

$$\vec{\gamma} = \vec{F} / M$$

$$\gamma = 2 \times 10^{-2} / 10^{-2} = 2 \ m.s^{-2}$$

Quand la masselotte est en équilibre à l'intérieur du tube, l'accélération qui lui est communiquée est bien évidemment identique, en module et en sens, à celle subie par la voiture. Cette accélération a été produite par la force de traction qui s'est exercée sur les pneumatiques des roues motrices au contact du sol.

Là encore, l'attribution d'un signe, choisi d'après le sens de déplacement de la voiture, permettra de préciser l'orientation spatiale de cette accélération, autrement dit, de faire la distinction entre la force de traction ou de freinage, bien réelles, et une force d'inertie complètement imaginaire !

L'inventeur de la force d'inertie…

L'affaire est entendue, les forces d'inertie n'existent pas. Mais alors, d'où vient la méprise ? En réalité, les mécanismes de la confusion sont anciens, complexes, et culturels.

Commençons par le commencement. L'idée de ramener les descriptions réelles à de simples problèmes de statique revient à Jean Le Rond d'Alembert, mathématicien et physicien français (1717-1783), surtout connu pour être l'un des rédacteurs de l'Encyclopédie [5]. L'inventeur des forces d'inertie, c'est lui !

Se penchant sur l'œuvre de Newton et la jugeant incomplète, d'Alembert conçut d'inverser le raisonnement en considérant que tout corps accéléré pouvait être décrit comme étant immobile, son état d'inertie le rendant capable de générer une force, etc. Une démarche qui, finalement, aurait pu lui valoir le sobriquet de ''*d'À l'envers*'', mais qu'importe, Descartes était vengé [6] !

Prodigieuse acrobatie mentale, hélas sans grand intérêt, du moins pour le domaine qui nous occupe. Logique purement imaginaire, déclinée à tort et à travers, adaptée à toutes les sauces, processus tellement conforme à la tradition intellectuelle française qui, contrairement à la culture anglo-saxonne, préfère l'abstraction plutôt que la réalité, le concept plutôt que son application, la théorie plutôt que la pratique…

Le rôle des professeurs…

Le concept est une chose, l'engouement pédagogique qu'il peut susciter en est une autre. Quel rôle les professeurs ont-ils joué dans la mystification ?

Même s'il est bien évident qu'aucun professeur de physique digne de ce nom n'a jamais pu confondre l'origine d'un phénomène et ses effets, la cause d'un mouvement et ses conséquences, une description réelle et une description imaginaire, toute démarche scientifique consistant justement à chercher des explications parfois contre-intuitives à des observations qui ne sont logiques ou rationnelles qu'en apparence, le résultat est là.

Le raisonnement de d'Alembert, relayé quelques années plus tard par celui de Gaspard Coriolis (l'inventeur de la force qui porte son nom, voir le dossier ADILCA ''*force de Coriolis*''), rencontra un vif succès, non seulement auprès des intellectuels français, mais aussi du corps enseignant, à un point tel qu'on peut même parler d'une certaine fascination…

Et comme la plupart des professeurs de physique sont restés confinés dans des salles de cours, des amphithéâtres ou des laboratoires, ils ont axé leur enseignement sur ces fameux concepts imaginaires. Peu soucieux de pragmatisme, déconnectés de la réalité, ils ont oublié d'en délivrer le mode d'emploi.

Bref, au fil du temps et des cours, les descriptions imaginaires ont irrésistiblement supplanté les descriptions réelles.

Les manuels scolaires de physique…

Que doit-on penser des manuels scolaires de physique ?

Il suffit de jeter un coup d'œil sur les productions actuelles, tous niveaux confondus (collèges, lycées, enseignement supérieur) pour constater l'ampleur du phénomène. Le moins que l'on puisse dire, c'est que ces manuels font la part belle aux descriptions imaginaires !

Cependant, l'honnêteté, la bonne foi ou les bonnes intentions des auteurs ne sont pas en cause. En effet, la plupart de ces ouvrages ayant été rédigés par des théoriciens et non par des hommes de terrain, il est tout à fait logique d'y retrouver les descriptions des uns au détriment de celles des autres (voir le dossier ADILCA ''*Cessac et Tréherne*'').

Ajoutons que, lorsqu'il s'agit de rédiger un manuel de physique, le concept de force d'inertie est très pratique puisqu'il s'agit d'un concept générique global capable de s'adapter à nombre de phénomènes.

Au contraire, la description d'un mouvement réel exige beaucoup plus de minutie, au sens étymologique du terme, et relève plutôt de l'ouvrage spécialisé : les forces qui s'exercent sur une voiture, par exemple, ne sont pas exactement les mêmes que celles qui s'exercent sur un bateau, un avion ou un satellite, il est donc long et délicat de les recenser et de les exposer en détail.

… et ceux qui les ont lus !

Comment les lycéens et étudiants ont-ils assimilé ces nuances ?

La pédagogie, c'est l'art de contrôler ce qui se passe dans la tête des élèves. Ici, les connaissances sophistiquées, l'honnêteté et les bonnes intentions ne peuvent plus suffire !

Hélas, le système a toujours fonctionné en circuit fermé : à travers les examens, les professeurs n'ont validé que les connaissances jugées fondamentales, dans les limites de leurs compétences et de leurs connaissances.

Mettons-nous à la place des élèves : quand le discours des professeurs et celui des manuels scolaires se conjuguent pour seriner en boucle le dogme obligatoire, il est bien difficile d'échapper à l'endoctrinement ! Oui, même en science, c'est possible !

Le résultat est là, consternant : dans les cerveaux, la logique des descriptions imaginaires a irrésistiblement supplanté celle des descriptions réelles. Une petite enquête auprès d'étudiants ou jeunes diplômés suffit pour s'en convaincre.

Conclusion

La force d'inertie est, avec la force centrifuge et la force de Coriolis (voir les dossiers ADILCA ''*force centrifuge*'' et ''*force de Coriolis*''), l'une des trois forces fictives (appelées également forces apparentes ou pseudo-forces) qui sont utilisées par les physiciens dans le cadre de descriptions purement imaginaires.

Mais aucune de ces trois forces n'existe réellement ! Il est donc strictement impossible d'en observer, d'en ressentir ou d'en mesurer les effets ! Qu'on se le dise !

(1) *En réalité, la surface de contact entre la benne et le ballon ne permettant pas un glissement total, le ballon se met à tourner sur lui-même, acquérant ainsi une énergie cinétique de rotation. Si le camion stoppe brutalement, cette énergie accumulée peut suffire à entraîner le ballon vers la ridelle arrière. Dans le cadre de cette expérience, c'est ce qu'on appelle un artéfact.*

(2) *Contrairement à ce qu'on pourrait penser, cette manipulation est courante en physique : on dit alors que le camion est devenu un ''référentiel non inertiel'', ou ''référentiel non galiléen'' (nous préférons l'appellation de ''référentiel restreint'' qui en montre bien les limites…). Ça signifie concrètement qu'il est désormais interdit de décrire son mouvement propre ! Bref, il faut faire comme si le camion était immobile !*

(3) *Attention ! Ce principe ne s'applique qu'à des forces réelles, jamais à des forces fictives. En effet, dans une description imaginaire, les interactions n'existent pas. Isaac Newton n'a pas pu le préciser, les forces fictives étant inconnues à son époque.*

(4) *Si on compare un camion de 10 tonnes et la Terre (6 x 10^{24} kg), le rapport des masses est de 1 pour 600 milliards de milliards, à l'avantage de la Terre, au détriment du camion…*

(5) *Son titre complet est "*Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*", ouvrage gigantesque visant à faire le point des connaissances de l'époque, le premier du genre publié en France (1772). Dans ce domaine-là également, les Anglais avaient tiré les premiers : un ouvrage similaire intitulé "*Cyclopaedia*", rédigé à l'initiative d'Ephraim Chambers, circulait déjà en Angleterre depuis 1732.*

(6) *La rivalité franco-anglaise de l'époque ne s'est pas limitée aux seuls domaines de l'industrie et du commerce, elle s'est manifestée également au travers des sciences et du raisonnement scientifique. Ainsi, pour expliquer le mouvement des planètes du système solaire, René Descartes, mathématicien et philosophe français (1596-1650), avait supposé l'existence d'un fluide ("*éther*") agissant comme un courant d'air, hypothèse définitivement balayée par Newton.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

*** * ***